

## Секция 1. Пучково-плазменные и электроразрядные технологии.

$$B_b = \frac{1}{4\pi} \frac{2I_b}{cr_b} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}, \quad (9)$$

где  $r_b$  – радиус пучка.

Величина собственного магнитного поля для исходных параметров пучка составила  $B_b = 0.06$  Тл. Меньшее значение напряженности внешнего магнитного поля приводит к недостаточному ослаблению собственного магнитного поля и как следствие самопинчеванию пучка.

**Выводы.** Недостаточная величина магнитного поля ведет к некоторому сжатию пучка и увеличению плотности заряда. При этом в условиях недостаточно высокой плотности плазмы, это приводит к образованию виртуального катода и имеет место отражение части электронов, в первую очередь на оси пучка.

Таким образом, для обеспечения эффективной транспортировки СЭП необходимо соблюсти несколько условий: 1) плотность плазмы заполняющей трубу дрейфа должна соответствовать или превышать плотность пучка ( $n_0/n_b \geq 1$ ), 2) напряженность внешнего магнитного поля должна превышать величину собственного магнитного поля пучка ( $B_z/B_b \geq 1$ ).

## Список литературы:

1. Григорьев В.П., Коваль Т.В., Кухта В.Р., Рахарджо П., Уемура К. // Исследование транспортировки и фокусировки низкоэнергетического электронного пучка в ионизованном аргоне низкого давления // Журнал технической физики, 2008, Т. 78, № 1, С. 104–108.
2. Григорьев В.П., Вагин Е.С., Офицеров В.В. // Модель макрочастиц зарядовой нейтрализации электронного пучка при инжекции в плазму низкого давления // Известия Томского политехнического университета, 2010, Т. 316, № 2, С. 85–89.
3. Крейндель М.Ю., Литвинов Е.А., Озур Г.Е., Проскуровский Д.И. // Нестационарные процессы в начальной стадии формирования сильноточного электронного пучка в плазмонаполненном диоде // Физика плазмы, 1991, Т. 17, № 12, С. 1425–1431.
4. Назаров Д.С., Озур Г.Е., Проскуровский Д.И. // Генерация низкоэнергетичных сильноточных электронных пучков в пушке с плазменным анодом // Известия вузов. Физика, 1994, Т. 37, № 3, С. 100–114.

## ПОЛУЧЕНИЕ РТ-РН НАНОПОРОШКОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКА

*А.В. Коршунов, д.х.н., профессор,*

*М.Н. Власюк, А.В. Пустовалов, С.П. Журавков*

*Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина, 30,*

*E-mail: pustovalov@tpu.ru*

В настоящее время проблема разработки новых износостойких конструкционных материалов, обладающих высокой термостойкостью, в ряде

областей промышленности стоит чрезвычайно остро. В последнее время динамично развивается индустрия производства волокнистых теплоизоляционных материалов на основе стекла. Температуры переработки указанных стекольных расплавов достигают 1200-1300 °С. На производстве для формирования стекольной массы в виде волокон используются фильеры [1], изготовленные из платино-родиевых сплавов. В последнее время для упрочнения фильер стали разрабатывать новые подходы – разрабатывать дисперсно-упрочненные материалы, представляющие собой композиции из листовых материалов и нанопорошков из платино-родиевых сплавов, а также специальных добавок, которые и обеспечивают повышенную износо- и термостойкость всей композиции. Одним из недорогих и перспективных методов получения металлических порошков имеющих размер частиц около 100 нм, является метод электрического взрыва проводника [2]. Достоинство данного метода, является достаточно высокая производительность и сравнительно низкие энергозатраты. Цель данной работы - изучить возможность получения нанопорошков из платино-родиевого сплава методом ЭВП, подобрать оптимальные режимы взрыва, а так же исследовать некоторые свойства получаемого порошка.

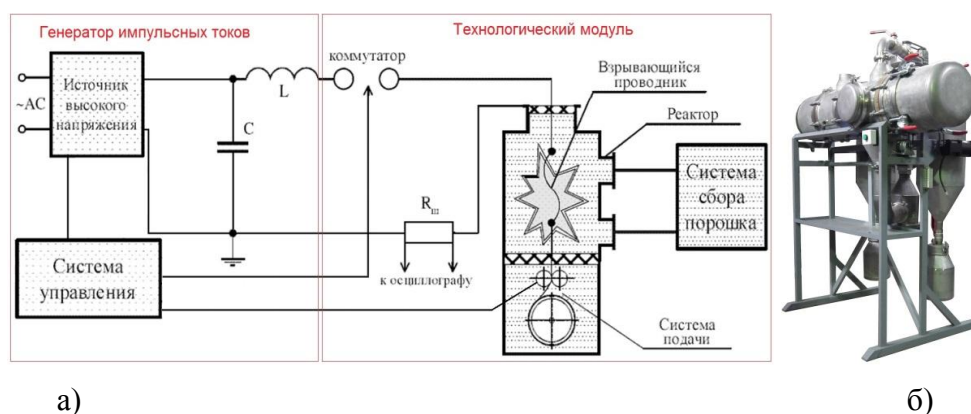


Рис. 1. Экспериментальная установка по получению Pt-Rh нанопорошка: а) схема; б) фотография технологического модуля.

Получение Pt-Rh нанопорошков осуществляли на экспериментальной установке (рис. 1) в атмосфере аргона. Установка работает следующим образом: источник высокого напряжения заряжает батарею конденсаторов до заданного уровня напряжения, после чего включается система подачи проводника. При достижении конца металлического проводника поверхности высоковольтного электрода, срабатывает коммутатор, в результате чего конденсаторы разряжаются на отрезок проводника расположенный между высоковольтным и заземленным электродами. Проводник взрывается, продукты взрыва разлетаются в объем взрывной камеры, наполненной аргоном, в виде пара и капель расплавленного металла, которые при последующей конденсации превращаются в тонкодисперсные металлические порошки. Затем продукты взрыва в виде порошка выносятся потоком газа из объема взрывной камеры и собираются в системе сбора порошка. Источник высокого напряжения повторно заряжает конденсаторную батарею, а система подачи обеспечивает подвод следующего участка проводника к высоковольтному электроду.

Закономерности протекания электрического взрыва проводника (энергию, вводимую в проводник, энергию, выделяемую в дуговой стадии разряда, время

взрыва и плотность протекаемого тока), исследовали по осциллограммам тока, зафиксированным с помощью токового шунта и осциллографа Tektronix TDS2014B. Полученные осциллограммы обрабатывали по методике [3].

Для реализации ЭВП сплава Pt-Rh использовали платинородиевую проволоку марки ПЛРД90-10 (массовая доля Pt – 90,1 %, Rh – 9,8 %) диаметром 0,3 мм, длину взрывающего участка проводника изменяли от 40 до 200 мм. Конденсаторную батарею емкостью 2,4 мкФ, заряжали до напряжения 20-30 кВ. Индуктивность разрядного контура составляла 0,8 мкГн. Процесс ЭВП осуществляли в атмосфере аргона при давлении 2 атм.

Свойства полученных порошков изучали с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100F, сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения JSM-7500FA и рентгеновского дифрактометра XRD-7000S. Дополнительно, с помощью анализатора Сорбтометр-М (метод БЭТ) по низкотемпературной адсорбции азота изучали величину площади удельной поверхности.

На рисунке 2 представлены типичные осциллограммы тока ЭВП. Все исследуемые режимы взрыва можно разделить на три группы [4]. Первая – ЭВП с паузой тока (рис. 2. а). В данном режиме взрыва наблюдается две явно выраженные стадии. На первой стадии происходит сам процесс взрыва – нагрев проводника импульсом тока, его плавление, дальнейший нагрев и разрушение. Продукты ЭВП имеют высокую электрическую прочность, но по мере их расширения электрическая прочность снижается, в определенный момент времени происходит их пробой.

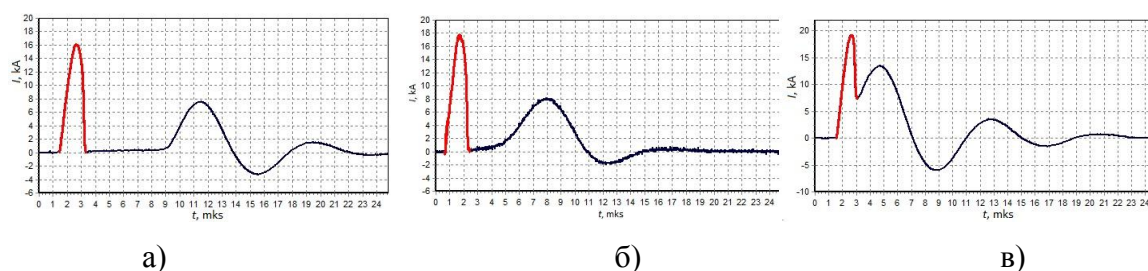


Рис. 2. Осциллограммы тока ЭВП. а) взрыв с паузой тока; б) критический режим взрыва; в) взрыв без паузы тока.

При уменьшении длины проводника с сохранением остальных условий ЭВП, длительность паузы тока (промежутка от окончания ЭВП до пробоя продуктов взрыва) сокращается, и в определенный момент наблюдается осциллограмма тока с нулевой паузой (рис. 2.б.). Данный режим взрыва в литературе принято называть – «критическим». Длину проводника обеспечивающую критический режим – обозначают критической длиной проводника ( $l_k$ ). Дальнейшее уменьшение длины проводника приводит к переходу в режим без паузы тока (рис. 2. в).

На рисунке 3, изображены графики зависимости критической длины проводника (а), и энергии, вводимой в проводник в критическом режиме взрыва, (б) от рабочего напряжения. Для удобства анализа данных энергию, вводимую в проводник, представляли в виде безразмерной величины  $e/e_c$ . Где  $e$  – удельная энергия,  $e_c$  – энергия сублимации Pt = 58,2 Дж/мм<sup>3</sup>.

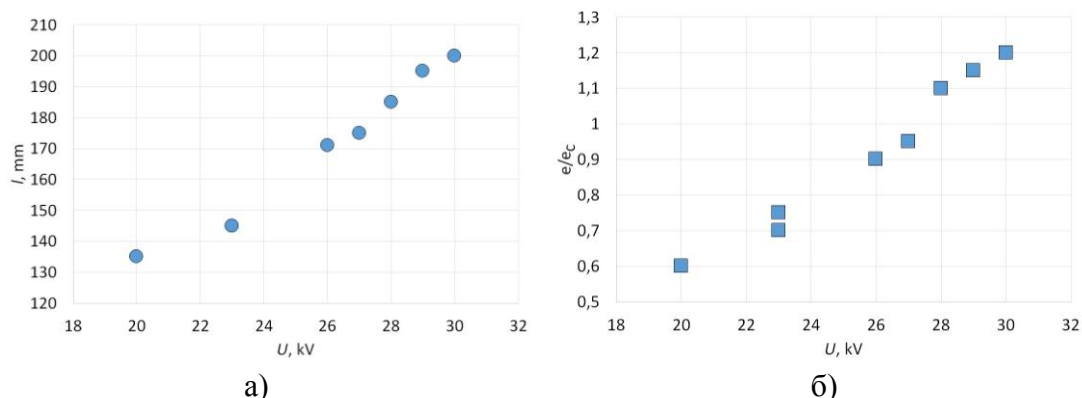


Рис. 3. Зависимости критической длины проводника ( $l_k$ ) (а) и энергии вводимой в проводник при взрыве ( $e/e_c$ ) (б) от напряжения.

Из приведенных графиков следует, что с увеличением напряжения прикладываемого к проводнику, для сохранения критического режима взрыва длину проводника следует увеличивать, при этом энергия, вводимая в проводник, так же возрастает.

Так как дальнейшее увеличение рабочего напряжения, является не целесообразным, то дополнительно были исследованы режимы без паузы тока. При исследовании все параметры эксперимента оставались неизменными, а уменьшали только длину взрывающегося проводника.

На рисунке 4, представлена зависимость  $e/e_c$  от длины взрывающегося проводника.

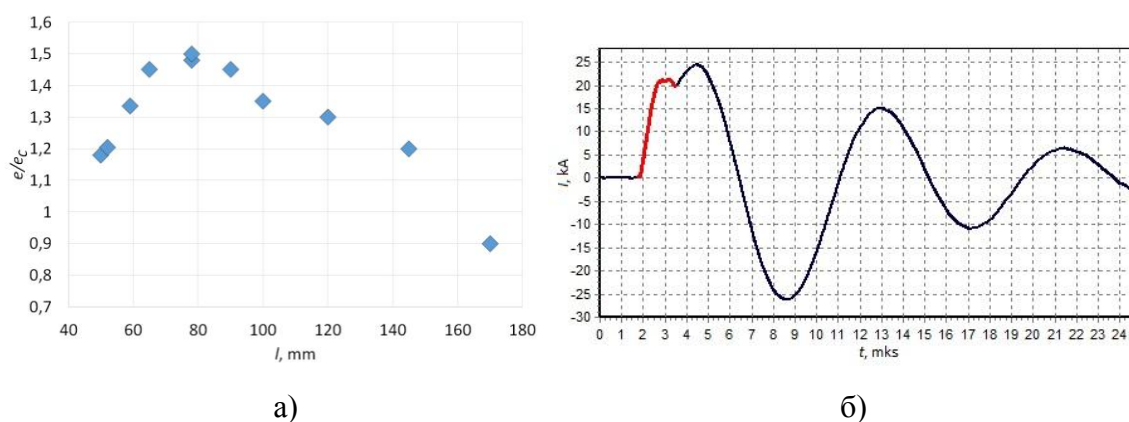


Рис. 4. а) Зависимость энергии, вводимой в проводник от его длины ( $U=26$  кВ,  $l_k=165$  мм); б) Осциллограмма тока ЭВП в режиме максимального уровня  $e/e_c$ .

Из графика (рис. 4, а), следует, что возрастание энергии, вводимой в проводник, наблюдается лишь при уменьшении его длины с 165 мм до 80 мм. Дальнейшее уменьшение длины взрывающегося проводника приводит к раннему возникновению дуговой стадии разряда и снижению уровня  $e/e_c$ . Таким образом существует режим ЭВП с максимальным уровнем  $e/e_c$ . Для получения порошков Pt-Rh сплава использовали именно этот режим взрыва (рис. 4, б). Результаты обработки осциллограмм показали, что удельная энергия, вводимая в проводник в данном режиме взрыва, составила  $1,5 e_c$ , а энергия, выделяемая в дуговой стадии разряда –  $1,1 e_c$ .

На рисунке 5 приведены фотографии частиц полученного порошка.

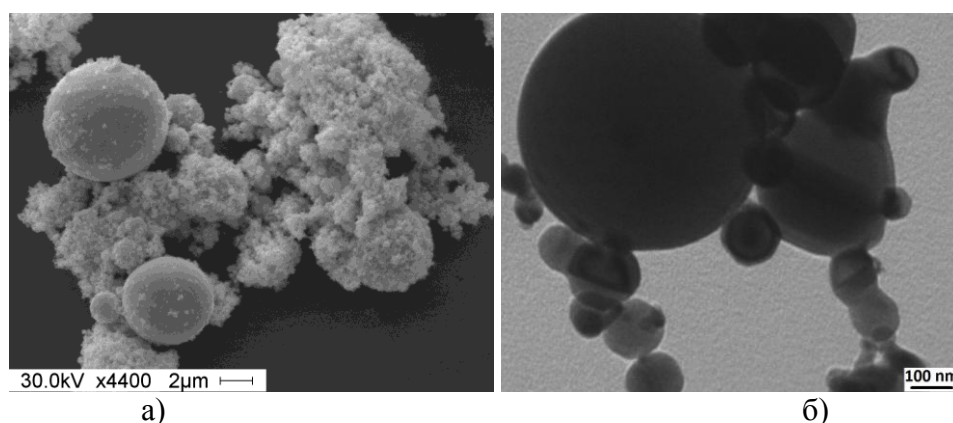


Рис. 5 СЭМ фотография (а) и рентгенограмма (б) полученного Pt-Rh порошка.

Исследуемый образец состоит из сферических частиц размером от 50 нм до 5 мкм. Крупные частицы, образованные при плавлении и разбрызгивании материала проводника, имеют сферическую форму. Частицы нанометровой фракции, образованные из паровой фазы, имеют преимущественно полиэдрическую форму (вероятно – форму икосаэдра). Полиэдрическая форма свидетельствует о том, что мелкие частицы представляют собой монокристаллы. Для мелких частиц наиболее характерная структурная особенность - формирование двойников (частицы с "перегородкой" внутри). Часть частиц мелкой фракции спекаются и образуют цепочечные структуры.

Результаты исследования по методу БЭТ показали, что площадь удельной поверхности полученных порошков равна  $1,9 \text{ м}^2/\text{г}$ , что соответствует величине среднеповерхностного диаметра частиц - 150 нм.

По данным микродифракции и РФА частицы состоят из сплава Pt<sub>0.85</sub>Rh<sub>0.15</sub> или 91,5 % (мас.) Pt, и 8,5 % (мас.) Rh. Средняя величина размера областей когерентного рассеяния составила 50 нм, что близко к размерам частиц мелкой фракции.

**Выводы.** Проведенные исследования позволили определить оптимальные параметры ЭВП обеспечивающие режим с максимальным уровнем энергии вводимой в проводник при взрыве. Анализ свойств полученных порошков показал, что при электрическом взрыве Pt-Rh проводника возможно, получать нанопорошки состоящие из сферических частиц размером от 5 мкм до 50 нм, фазовый состав которых соответствует рентгенограммам характерным для сплава Pt-Rh.

### Список литературы:

1. Болтон У. Конструкционные материалы, металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты. Карманный справочник // Пер с англ. – М.: Додека-XXI, 2004. – 320 с.
2. Kotov Yu. A. The Electrical Explosion of Wire: A Method for the Synthesis of Weakly Aggregated Nanopowders // Nanotechnologies in Russia. – 2009. – V. 4, – №. 7. – P. 415–424.
3. Кварцхава И.Ф., Бондаренко В.В., Плюто А.А., Чернов А.А. Осциллографическое определение энергии электрического взрыва проволок // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики – 1956. – Т.31. – №. 5. – С. 745-751.
4. Яворовский Н.А. Получение ультрадисперсных порошков методом электрического взрыва // Известия вузов. Физика. – 1996. – №4. – С. 114-136.